历史建筑保护中的结构安全与防灾*



李 杰
同济大学土木工程学院 上海 200092

摘要 文章从历史建筑保护中的安全与防灾问题切入，论述了结构工程安全与防灾中的基本科学问题，强调了灾害危险性分析、材料与结构破坏的科学基础、结构随机灾害反应分析、结构整体抗灾可靠性评估等基本问题的研究之于历史建筑保护研究的必要性与重要性，梳理了历史建筑结构安全与防灾研究应予关注的结构工程前沿技术，提出了若干发展建议。

关键词 历史建筑，结构，安全，防灾

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2017.07.007

建筑工程是人类文明发源的基本标志之一，也是现代文明进步的主要标志。在漫漫历史长河中幸运留存的历史建筑，是人类文明的瑰宝。保护历史建筑，业已成为现代社会的共识[1]。

早在1928年，我国即已从政府层面颁布了《名胜古迹文物保存条例》。新中国成立后，中央政府于1961年颁布了《文物保护管理暂行条例》。之后，又于1981年颁布实施了《文物保护法》，使历史建筑的保护在中国公众视野中逐步得到重视。进入21世纪，缘于对工程建设飞速发展进程的反思与现实经验教训，历史建筑保护越来越得到有识之士的关心与重视。迄于近年，历史建筑保护业已成为建筑科学的前沿[2]。

然而，尽管我国在历史建筑保护中成就斐然，但细加检点不难发现，历史建筑保护中的结构安全与防灾问题尚未得到结构工程界人士的足够重视。从事结构工程研究的学者，大多将精力集中于新建工程的安全与防灾研究之中，而从事历史建筑保护研究的学者，则可能对结构工程研究中的结构安全与防灾的成果所知甚少。如何疏通结构工程与历史建筑保护研究之间的渠道，显然是历史建筑保护学界与结构工程研究学界应该共同加以重视的问题。缘于这一背景，尽管笔者于历史建筑保护所知甚少，仍然希望从结构工程角度谈一点浅见，以贡献于万一、以就教于方家。

* 修改稿收到日期：2017年4月4日

1 结构安全与防灾的基本科学问题和研究进展

地震、台风、火灾与环境侵蚀是工程结构服役过程中所面对的主要自然灾害，也是历史建筑所面临的主要威胁。从结构安全与防灾角度考察历史建筑保护，所要研究的基本科学问题至少应包括：自然灾害危险性分析、结构受灾害作用而破坏的物理机理、结构随机灾害响应分析与结构抗灾可靠性分析等问题。

1.1 自然灾害危险性分析

自然灾害在发生时间、发生地点与发生强度上均具有随机性，这就要采用概率论的思想与方法进行灾害的危险性分析。纵观过去近百年的研究历程，可以发现：在这一方面的研究中，基于物理的灾害危险性分析理论正在逐步替代基于统计的灾害危险性分析方法。

图 1 是我国 2015 年颁布的第 5 代地震区划图[3]。这一区划图，给出了我国各地区对应于不同超越概率的地震动加速度峰值区划。显然，这一工作为历史建筑保护中的抗震鉴定、抗灾加固与抗震修复提供了极为重要的基础参考，也为规划与文物管理部门制定宏观决策提供了科学依据。然而，从地震区划的角度制定历史建筑总体保护规划决策的工作，似乎还没有提上日程。

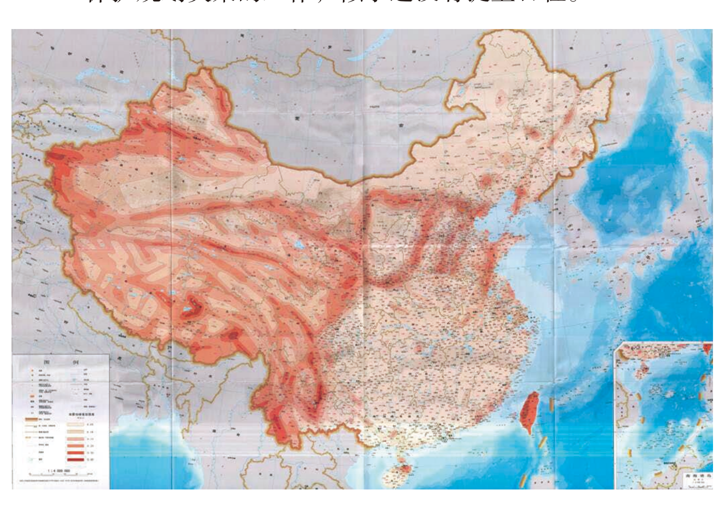


图 1　中国第 5 代地震区划图

第 5 代地震区划图在本质上仍然沿袭了第 3 代、第 4 代中国地震区划图的编图思想。这一思想实质是基于 1968 年美国科学家 Cornell 提出的地震危险性分析点源模型[4]，我国科学家在点源模型的基础上发展了综合概率法，由此形成了我国地震区划图编图的科学基础。这一基础的科学内涵在于：将历史地震的统计规律与地震传播的基本规律相结合，形成合理预测在给定年限内地震动峰值概率分布的理论体系[5]。显然，这种思想方法具有普遍意义。20 世纪 90 年代后期在世界范围内展开的台风危险性分析研究，正可以视为这种理论衣钵的传承。

图 2 是按照台风危险性分析给出的我国风速区划图[6]。与地震区划类似，这一区划图给出了给定重现期内的我国各地区基本风速分布态势。显然，这一区划图同样会对历史建筑的总体保护规划、修复中的抗风设计等发挥关键作用。

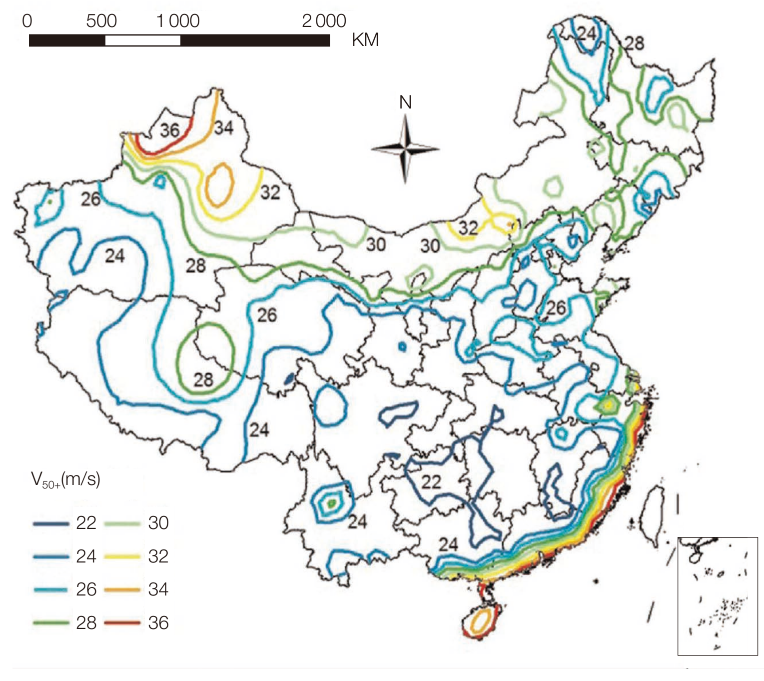


图 2　中国基本风速区划图（未含台湾地区数据）

进入 21 世纪，关于灾害危险性区划的研究工作还扩展到了环境侵蚀作用的研究领域（图 3）[7]。尽管还没有提出这种环境作用区划的明确物理基础，但作为大范围、长时间尺度的统计研究成果，无疑会对历史建筑的保护起到基础性的作用。

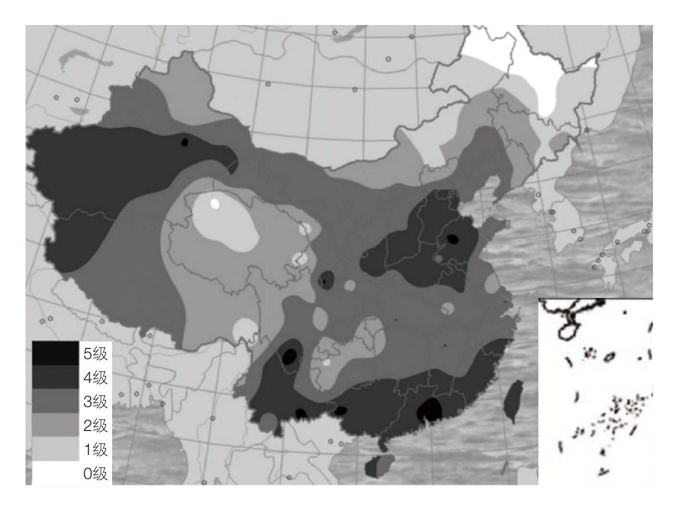


图 3　耐久性环境作用等级区域划分

显然，在城市范围内进行基于统计的火灾危险性研究，同样会对历史建筑保护具有重要的参考价值。这方面的研究，还处在起步阶段。

1.2　材料与结构破坏的科学基础

现代意义上的结构设计，起源于 19 世纪 20 年代。发端于 Navier 的材料力学研究传统，肇始于 Cauchy 的固体力学研究传统，逐步形成了工程结构安全设计的科学基础[8]。

材料力学研究的对象主要是梁、柱构件。19 世纪早期，出于确立构件承载力的现实需要，先哲们将刚体（梁）受力的原理应用于弹性体，逐步创立了材料力学基本体系，其科学本质，在于通过细观的应力强度确定宏观的基本构件承载力，从而用于保证结构安全的设计。进入 20 世纪 30 年代，出于经济性的考量，合理利用材料塑性的观点逐步成为业内同仁的共识，关于钢材、钢筋混凝土、木材、砖石结构的研究，共同形成了非线性材料力学的总体框架。而由于科学分工的细化，作为具有共同科学内涵的非线性材料力学观念，却令人遗憾地没有被明确提出过，这在某种程度上影响了结构工程学科的进步。

材料力学对于结构整体受力力学非线性行为是缺乏科学反映能力的，这一本质规定性与基本局限性导致了结构非线性受力全过程研究在 20 世纪 60 年代初的兴起。历史的高度自觉性恰恰表现在：在 20 世纪 60 年代，有限元分析理论与技术开始兴起。这种天造地设般地“巧合”，使长期偏安于理论一隅的固体力学研究在结构工程实践中找到了用武之地。从 20 世纪 50 年代塑性力学完备理论体系的形成，经由 20 世纪 60 年代断裂力学的兴盛，再到 20 世纪 70 年代损伤力学的兴起，迄至 21 世纪初，基于唯象学的固体力学基本体系已经森严壁垒、蔚然大观。基于这一基本体系，并结合有限元技术的应用，今天结构工程领域的科学工作者已经可以清晰地刻划与反映结构在各种外部作用下（包括灾害作用）从材料损伤到结构整体破坏的科学全过程。显然，上述背景为历史建筑保护中的结构安全与防灾提供了科学基础。在历史建筑保护中，因地制宜地在官式建筑、风土建筑保护中注意材料力学传统的继承与应用，在近现代建筑保护中注重采用以固体力学为基础的抗灾全过程分析研究成果，应是现实可行的选择。

1.3　不确定性量化与结构灾害响应分析

在历史建筑保护中，充满各种不确定性，如结构所面临灾害风险的不确定性、结构物理参数的不确定性、结构寿命中受力力学行为演化的不确定性、结构承载能力的不确定性，等等。科学、合理地量化各种不确定性，是历史建筑保护中的关键科学问题，也是结构工程研究自 20 世纪 30 年代以来的研究主题之一。

保证结构的安全性，是工程结构设计的主体任务之一。在近代结构设计理论的初创时期，由于对客观不确定性认识尚处于定性的初级阶段，人们采用经验安全系数的方法来规避不确定性对结构安全性的影响。在 20 世纪初，结构设计的经验安全系数甚至高达 10 以上[9]。1926 年，德国科学家 Mayer 首先倡导用概率论来定量反映客观随机性对结构安全性的影响，由此开创了结构可靠性理论研究的先河。1947 年，移居美国的波兰科学家 Freudenthal 首次提出了结构可靠性分析的工程实用方法[10]。此后，经由 Cornell、Ang、Lind 等的工作[11-13]，基于可靠度设计结构并利用概率衡量结构安全性的理念与

方法开始在世界范围内得到传播和认可，并成为主要国家工程结构设计规范编制的依据。令人遗憾的是，在历史建筑保护的相关研究中，尚未见到关于结构可靠性的专门论述。这方面的研究与应用，显然是需要予以加强的。

20 世纪 50 年代，动力作用（包括灾变性动力作用）随机性对结构安全性的影响开始受到科学家与工程师的极大重视，作为一门新兴学科，随机振动理论在 20 世纪 60 年代初建立[14]。迄至 20 世纪 60 年代中期，工程结构在地震、强风等灾害性动力作用下的线性响应分析方法基本建立。与此同时，结构物理参数的随机性也在 20 世纪 60 年代末开始得到重视。至 20 世纪 80 年代，以考虑随机结构分析为主体的随机有限元研究已开始具有分支学科的规模[15]。然而，直至 20 世纪 90 年代末，无论是随机振动分析还是随机结构分析，都难以解决复杂结构的非线性响应分析问题，这使得在工程结构设计中考虑灾害性动力作用影响受到了极大的限制。

21 世纪以来，中国科学家在概率密度演化理论方面的工作，打破了上述僵局。物理研究随机系统思想的提出，使工程随机系统的研究生发出新的、生机勃勃的发展局面[16]。迄于近年，在世界范围内关于不确定性量化的研究热潮，更使概率密度理论有了更为广阔的用武之地。事实上，不确定性的量化仅仅是对客观随机性进行科学反映的第一步；结合物理规律，研究随机性在工程系统中的传播规律，才能更为客观全面地认识不确定性对工程系统的种种影响并加以科学决策。而这种决策，不仅是工程结构安全设计所必备的，也是历史建筑保护研究的题中应有之义。

1.4 工程结构整体抗灾可靠性

历史建筑大多经历了上百年甚至数百年的时间考验。我国 7 世纪建造的赵州桥，历经 1 400 余次洪灾、地震考验而安然无恙；11 世纪建造的山西应县木塔，历经千年中的台风、地震侵袭而安然无恙。这些实例本身，就是结构整体抗灾可靠性的难得研究范例。

然而，从科学层面解析，工程结构的整体抗灾可靠性设计问题、尤其是多种灾害作用下的结构可靠性分析问题，却是至今仍未得到很好解决的关键科学问题。事实上，早在 20 世纪 60 年代中期，人们就开始致力于研究工程结构的整体可靠性分析与设计问题[17-19]。令人遗憾的是，由于采用现象学的研究方法和引入理想弹塑性的假定，使得经典结构系统可靠性研究长期处于踏步不前的局面。举例言之，按照经典分析方法，对于图 4（a）所示的简单框架结构，当只是 1 层框架结构时，有 15 个破坏机构，而当 1 层框架结构扩展为 2 层时，破坏机构数就迅速增加至 255 个（图 4（b）给出破坏机构的部分示例）！这就是所谓的组合爆炸问题，而不同失效模式之间的概率相关性，则进一步带来数学分析中的失效相关难题，也进一步加剧了结构整体可靠性分析的难度。

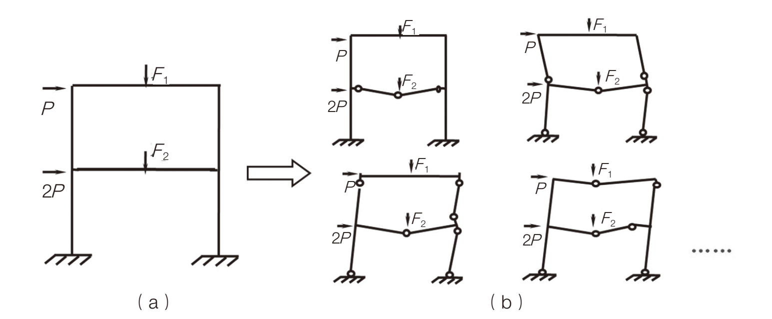


图 4　失效模式相关的组合爆炸问题

解决上述难题的根本途径在于摒弃现象学传统，回到物理研究的轨道。近年来，基于非线性发展过程研究工程结构在灾害作用下的性态随机演化过程，为解决工程结构整体抗灾可靠性分析问题打开了希望之门[20]。将这一研究思想与历史建筑保护中所面临的多种灾害问题相结合，无疑会推动历史建筑保护中的安全与防灾研究的实质性进展。

2 历史建筑保护中的结构安全与防灾前沿技术

历史建筑保护，是多学科交叉、综合所形成的建筑学前沿学科分支。在其发展过程中，也理所当然地应该汲取其渊源相关学科的学术成果与前沿技术。在历史建筑保

护的结构安全与防灾研究中，注意采取结构工程中近年来致力于发展的前沿技术，当是题中应有之义。在笔者学识范围内，下列技术及其发展动向是值得关注的。

2.1 结构健康监测技术

对结构服役的性态进行观测的思想，最早可追溯到20世纪60年代。20世纪90年代中期以来，由于传感技术的小型化、微型化、无线化的发展取向，使健康监测技术应用得到了突飞猛进的发展[21]。与之相关，观测信号分析技术、结构损伤识别理论、大规模系统监测的传感器最优布设技术研究均取得长足的技术进步。图5是结构健康监测研究的基本构成。

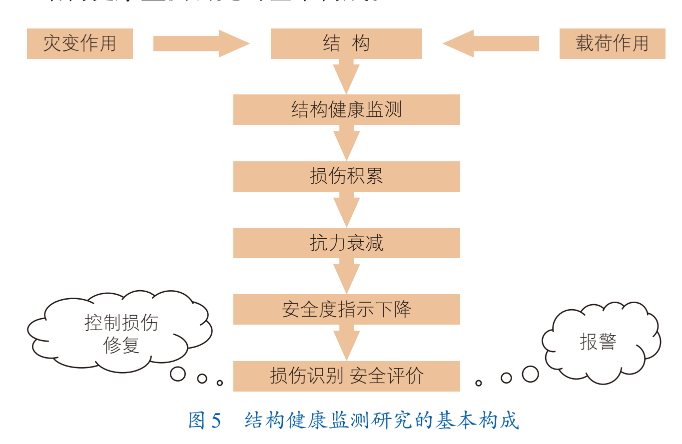


图5 结构健康监测研究的基本构成

令人欣喜的是，结构健康监测技术已经得到历史建筑保护领域学者的关注与应用。如在著名的西藏布达拉宫保护性修缮过程中采用结构健康监测的工程实例[22]，研究人员和技术人员为这一世界上海拔最高、规模最大、使用数百年的宫殿式建筑群在关键部位搭建起静、动态结合的结构健康监测网络，使管理者可以随时掌握布达拉宫的健康状态。显然，在历史建筑保护中采用结构健康监测技术，具有更为广阔的发展与应用前景。

2.2 结构控制技术

结构控制技术是现代控制理论与工程结构设计理论相结合的产物。始于1972年美国科学家Yao的建议[23]，20世纪80年代以来，结构控制技术在世界范围内得到了迅速发展。通过主动控制、被动控制或主、被动相结合的工程措施，减轻工程结构在地震、台风作用时的响应，以达到防灾减灾的目的，业已成为业界学者与工程师的共识。在历史建筑保护中，适当地、因地制宜地引入结构控制技术，对于保证结构的长期服役安全具有不言而喻的重要意义。在这里，具有挑战性的问题是：既运用结构控制技术而又不损及建筑物本身的历史风貌与精神价值。这显然需要结构工程师、建筑师甚至行政决策者具有创意的智慧与合作。

2.3 现代信息技术与大数据应用

在历史建筑保护中，应用3S（RS、GIS、GPS）技术是可预期的发展方向之一。基于遥感（RS）的结构监测、基于地理信息系统（GIS）的规划决策、基于全球定位系统（GPS）的建筑灾损状况监测，已在工程实践中初现端倪[24]。而近年来开始得到重视的虚拟现实技术，无疑也将在历史建筑保护的规划、设计、维护决策等方面得到更多的应用。

大数据技术，是值得在历史建筑保护中加以重视的又一个研究方向。以结构安全与防灾为例，历史建筑在服役过程中的荷载历史是进行历史建筑保护过程中的重要基础性数据。利用大数据技术，有可能通过对人流、环境作用、结构性态的监测，实现结构荷载历史的重构，从而使结构安全与防灾设计建立在更为坚实的科学基础之上。抛砖引玉，笔者期待着大数据技术在历史建筑保护中更多的、富有创意的应用。

3 结语

历史建筑是人类文明进步的结晶，凝聚了人类对精神家园的渴望与向往。在历史建筑保护中加强结构安全与防灾的研究，将可使历史建筑结构以更为坚实的身躯传承百年、千年。缘于这一重要背景，笔者虽然于历史建筑保护几近无知，但仍然斗胆从结构工程的角度阐述一些关键科学问题，提出一些方向性研究建议。冀望通过这种努力，吸引更多的历史建筑保护工作者关注于结构工程安全与防灾的最新研究成果与研究进展，也为缩小历史建筑保护研究与结构工程研究之间的距离略尽

绵薄之力。笔者相信：创造了五千年灿烂文化的中华民族，必可通过对历史建筑的不懈守护，在一个侧面向世界展现新中国的自信与伟岸！

参考文献

1 常青. 对建筑遗产基本问题的认知. 建筑遗产, 2016, (1): 44-61.

2 常青. 历史建筑修复的“真实性”批判. 时代建筑, 2009, (3): 118-121.

3 中国国家标准化管理委员会. 中国地震动区划图 (GB 18306-2015), 2015.

4 Cornell C A. Engineering seismic risk analysis. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(5): 1583-1606.

5 李杰, 李国强. 地震工程学导论. 北京: 地震出版社, 1992.

6 Mo H M, Hong H P, Fan F. Estimating the extreme wind speed for regions in China using surface wind observations and reanalysis data. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, (143): 19-33.

7 武海荣, 金伟良, 吕清芳, 等. 基于可靠度的混凝土结构耐久性环境区划. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46(3): 416-423.

8 Kurrer K E, Ramm E. The History of the Theory of Structures: From Arch Analysis to Computational Mechanics. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

9 赵国藩, 曹居易, 张宽权. 工程结构可靠度. 北京: 科学出版社, 2011.

10 Freudenthal A M. Selected papers by Alfred M. Freudenthal: civil engineering classics. New York: ASCE Transactions, 1947: 269-324.

11 Cornell C A. A probability-based structural code. Journal Proceedings, 1969, 66(12): 974-985.

12 Ang A H S, Tang W H. Probability concepts in engineering planning and design. New York: John Wiley and Sons, 1977.

13 Lind N C. Consistent partial safety factors. Journal of the Structural Division, 1971, 97(6): 1651-1669.

14 Caughey T K. Equivalent linearization techniques. The Journal of the Acoustical Society of America, 1963, 35(11): 1706-1711.

15 李杰. 随机结构系统：分析与建模. 北京: 科学出版社, 1996.

16 Li J, Chen J B. Stochastic Dynamics of Structures. Singapore: John Wiley and Sons, 2009.

17 Ditlevsen O. Narrow reliability bounds for structural systems. Journal of Structural Mechanics, 1979, 7(4): 453-472.

18 Murotsu Y, Okada H, Niwa K, et al. Reliability analysis of truss structures by using matrix method. Journal of Mechanical Design, 1980, 102(4): 749-756.

19 Thoft C P, Sørensen J D, Thoft C P. Calculation of failure probabilities of ductile structures by the B-Unzipping method. Aalborg: Instituttet for Bygningsteknik, Aalborg Universitets Center, 1982.

20 李杰, 陈建兵. 大型复杂结构非线性随机地震反应分析与倒塌全过程模拟. 地震工程与工程振动, 2014, 34(4): 48-56.

21 Spencer B F, Ruiz-Sandoval M E, Kurata N. Smart sensing technology: opportunities and challenges. Structural Control and Health Monitoring, 2004, 11(4): 349-368.

22 Lu D, Na Y, Zhang L. Monitoring crowd load effect on typical ancient Tibetan building. Structural Control and Health Monitoring, 2016, (23): 998–1014.

23 Yao J T P. Concept of structural control. Journal of the Structural Division, 1972, 98(7): 1567-1574.

24 汪祖进. 面向文物保护的3S技术及其集成应用. 文物保护与考古科学, 2002, 14(2): 52-58.

Structural Safety and Disaster Prevention in Historical Building Preservations

Li Jie

(School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract The present paper focuses on the fundamental scientific problems of the structural safety and disaster prevention in the preservation of historical architectures. The risk analysis of disasters, the scientific basis of material failure and structural damage, the response analysis of structures under stochastic disaster actions, and the assessment of structural system reliability against hazards are emphasized regarding their necessity and significance of protection research of historical buildings. The frontier technologies in structural engineering which should be particularly concerned about in the research of structural safety and disaster prevention of historic architectures are systematically reviewed, and several possible development technology directions for deep study afterwards are proposed as well.

Keywords historical architecture, structure, safety, disaster prevention and mitigation

李　杰　同济大学特聘教授，工学博士，丹麦王国奥尔堡大学荣誉博士，上海防灾救灾研究所所长，兼任国际结构安全性与可靠性协会执委会委员、国际土木工程风险与可靠性协会主席团成员、国际核心期刊*Structural Safety*、*International Journal of Nonlinear Mechanics*编委等学术职务。长期在工程防灾领域从事研究工作，在随机动力学、工程抗灾可靠性与生命线工程研究中取得了具有国际声望的成果，曾获国家自然科学奖二等奖，被美国土木工程师学会授予工程可靠性领域最高学术成就奖——Freudenthal奖章。E-mail: lijie@tongji.edu.cn

Li Jie　Distinguished Professor of Tongji University, Shanghai, China, where he serves as Director of Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief. He received the Ph.D. degree at the same University in 1988 and the Honorary Doctorate from Aalborg University, Denmark in 2013. From 1999 to 2004, Dr. Li was honored as a Cheung Kong Scholar Professor by the Education Ministry of China. In 2014, he was conferred the Freudenthal Medal by ASCE. Professor Li has been active in research on the stochastic dynamics, the damage mechanics, and the engineering reliability for more than 30 years. As a principle investigator, he established the probability density evolution theory of stochastic systems and therefore reveals secrete of stochastic physical world. Up to now, Professor Li has published more than 300 journal papers and four books, including *Introduction to Earthquake Engineering* (published in 1992), *Stochastic Structural Systems—Analysis and Modeling* (published in 1996), *Stochastic Mechanics of Structures* (published in 2009), and *Stochastic Damage Mechanics of Concrete Structures* (published in 2014). E-mail: lijie@tongji.edu.cn